



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ HYDROSTATICKÉHO
TLAKU**

DESIGN OF EQUIPMENT FOR HYDROSTATIC PRESSURE MONITORING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Zahrádka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír Pruša

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Michal Zahrádka**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Radomír Pruša**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh zařízení pro sledování hydrostatického tlaku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem bakalářské práce bude návrh programu pro sledování změny hydrostatického tlaku pomocí vývojové platformy Arduino. Součástí práce bude i vlastní konstrukční řešení měřícího zařízení. Předpokládané využití soustavy je nivelační měření ve stavebnictví. Důraz bude kladen na malé energetické nároky. Samotná práce bude doplněna o literární rešerši na téma měření hydrostatického tlaku, tlakové senzory a nivelační zařízení.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše na téma měření hydrostatického tlaku, tlakové senzory a nivelační zařízení.
Vytvořit konstrukční a programové řešení elektronického kapalinového nivelačního zařízení.
Navržený program implementovat do vývojové platformy Arduino.
Realizovat zkušební měření a ověřit za pomoci vhodného etalonu.
Zhodnotit celkovou energetickou náročnost systému.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

ĐAĐO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.

RIPKA, Pavel a Alois TIPEK. Modern sensors handbook. Newport Beach, CA: ISTE USA, 2007. ISBN 978-1-905209-66-8.

VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978--87106-93-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh a zhotovení nivelačního elektronického hydrostatického zařízení. Součástí práce je rešerše na současná nivelační zařízení a na metody měření tlaku s důrazem na měření hydrostatického tlaku. Celé zařízení má být realizováno na vývojové platformě Arduino. Užití sestaveného měřidla se předpokládá ve stavebnictví.

Abstract

The purpose of bachelor thesis is the design and manufacture of a leveling electronic hydrostatic device. Part of the thesis is a research for current leveling equipment and pressure measurement methods with emphasis on the measurement of hydrostatic pressure. The entire device is to be implemented on the Arduino development platform. The use of the assembled meter is assumed in the construction industry.

Klíčová slova

Nivelace, nivelační přístroje, měření tlaku, hydrostatický tlak, Arduino

Keywords

Leveling, leveling devices, pressure measurement, hydrostatic pressure, Arduino

Bibliografická citace

ZAHRÁDKA, Michal. *Návrh zařízení pro sledování hydrostatického tlaku*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132424>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radomír Pruša.

Čestné prohlášení

Prohlašuji že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radomíra Pruši s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21. května 2021

.....
Michal Zahrádka

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Nivelace.....	10
2.1 Niveláčnické nástroje.....	10
3 Měření tlaku.....	13
3.1 Deformační tlakoměry.....	14
3.1.1 Trubicové tlakoměr.....	14
3.1.2 Membránový tlakoměr.....	14
3.1.3 Krabicový tlakoměr.....	15
3.1.4 Vlnovcový tlakoměr.....	15
3.2 Silové tlakoměry.....	16
3.2.1 Pístový tlakoměr.....	16
3.2.2 Zvonový tlakoměr.....	16
3.3 Elektrické tlakoměry.....	17
3.3.1 Odporový tlakoměr.....	17
3.3.2 Piezoelektrický tlakoměr.....	18
3.3.3 Kapacitní tlakoměr.....	18
3.4 Hydrostatické tlakoměry.....	19
3.4.1 U-trubice.....	19
3.4.2 Nádobkový tlakoměr.....	20
3.4.3 Prstencový tlakoměr.....	20
3.5 Měření hydrostatického tlaku.....	21
4 Použité součásti.....	22
4.1 Popis zařízení.....	22
4.2 Arduino.....	22
4.3 LCD.....	23
4.4 Tlakový senzor.....	24
4.5 Teplotní čidlo.....	24
4.6 Sestavení.....	25
4.7 Programové řešení.....	26
5 Faktory ovlivňující měření.....	28
5.1 Závislost hustoty.....	28
5.2 Tíhová závislost.....	29

5.3 Tlaková závislost.....	29
5.4 Konstrukční chyby.....	29
6 Měření.....	30
7 Výsledky.....	30
8 Energetická náročnost.....	32
9 Závěr.....	33
Seznam použitých zdrojů.....	34
Seznam obrázků.....	37
Seznam tabulek.....	37
Seznam příloh.....	37

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a otestováním hydro-elektrického zařízení pro účely nivelace. V rámci rešeršní části se bude práce zabývat nejpoužívanějšími nivelačními nástroji. Dále se bude zajímat o principy a provedení tlakový senzorů. V rámci samotného návrhu a konstrukce je uvažováno s běžně dostupnými komponenty, vybranými pro jejich přesnost ale i jednoduchost použití.

Zařízení je vytvořeno na vývojové platformě Arduino. Postupně budou představeny všechny hlavní komponenty. Dále se probere programová část tvořená v prostředí Arduino IDE.

Měřením se ověří přesnost zařízení a odhadne se podíl nepříznivých vlivů na přesnost.

2 Nivelace

Nutnost měření nebo vytyčování vodorovných rovin, či náklonů, zjišťování a měření výšek je ve stavebnictví jedním ze základních potřeb. Už ve starověku architekti dokázali pomocí jednoduchých nástrojů postavit impozantní díla. Do Říma postavili stovky kilometrů akvaduktů, aby dokázali město zásobit město vodou. Tato díla musela být v mírném sklonu, aby vody proudila bez zastavení, a zároveň musel být náklon co nejmírnějším, aby voda dotekla nejdále.

2.1 Nivelační nástroje

Vodováha

Stálým pomocníkem ve stavebnictví k určování vodorovných rovin jsou vodováhy. Nejčastěji vodováhy využívají pohybu vzduchové bubliny v trubici s kapalinou. Nakloněním se bublina, vytlačována kapalinou, pohybuje skrz trubici ve směru k jejímu výše položenému konci. První takovéto vodováhy se objevily v již v 17. století. K jejich rozšíření však došlo až ve století 18. kdy se začala vyrábět s dostatečnou přesností.

Digitální vodováha

Zmenšené elektromechanické komponenty se uplatňují v mnoha oborech. Digitální vodováhy využívají několika akcelerometrů k velmi přesným měřením. Opatřeny displejem s aktuální hodnotou pomohou stálejším výsledkům měření než vodováhy s bublinkou. Vyšší cenová kategorie pak nabízí propojení vodováhy s úložnými zařízeními k jejich dalšímu zpracování.



Obr. 2.1..Digitální vodováha

Hadicová vodováha

Hadicová vodováha je konstrukcí velmi jednoduchá. Jedná se o dvojici propojených nádob, obvykle hadicí, naplněných kapalinou. V nádobách podle Archimédova zákona vytvoří kapalina v obou nádobkách stejnou hladinu a umožní tak přenášení rovin. Pokud obě nádobky opatříme stupnicí na odečítání můžeme měřit výškové rozdíly. Hadicové vodováhy jsou velmi přesné, při správné manipulaci až desetiny milimetru na délku hadice která bývá do 20 m. Mimo jiné patří mezi jejich výhody možnost k přenosu výšek a rovin za rohy.



Obr. 2.2.Hadicová vodováha

Elektronická hadicová vodováha

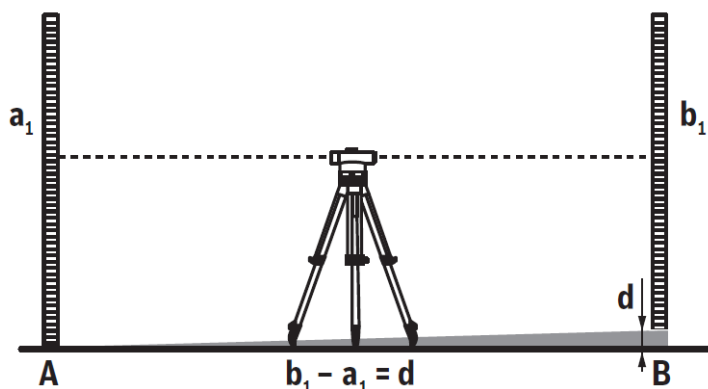
Na rozdíl od klasické hadicové vodováhy, elektronická nespohlá na vyrovnaný tlak, vytvořený sloupce kapaliny, ale na tlak, který na měřícím čidle sloupce kapaliny vznikne. Ten následně přepočítává elektronika na výšku od základního bodu, jímž bývá rezervoár kapaliny. V porovnání s klasickou vodováhou si ponechává si výhodu měření bez přímého zrakového kontaktu se základním bodem i poměrně velikou přesnost a přidává jednoduchost obsluhy a rychlost měření.



Obr. 2.3..Elektronická hadicová vodováha [10]

Geometrické měření

S těmito měřeními se setkáme především v zeměměřičství. Metoda vytváří vodorovnou rovinu mezi dvěma body za pomoci nivelačního přístroje a nivelační lati. Pro každý krok se z latě odečte hodnota nivelačním přístrojem a do dalšího kroku se nivelační přístroj přesune na pozici latě a lat' na novou měřenou pozici. Jako nivelační přístroje se používají dalekohledy nebo lasery.



Obr. 2.4..Měření nivelačním přístrojem [27]

Laserové měření

Moderní nástroje jakými jsou rotační a křížové lasery dokáží značně ulehčit práci. Dokážeme s nimi určit přesnou horizontální a vodorovnou rovinu na velkém úseku. Většina přístrojů je navíc vybavena samonastavovacími funkcemi, stačí je tedy jen umístit na vhodnou podstavu. V případě, že paprsek není dostatečně viditelný je vhodné využít laserového přijímače.



Obr. 2.5..Rotační laser [23]

3 Měření tlaku

Tlak je fyzikální veličina, kterou lze definovat jednoduchým vztahem:

$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Jednotkou tlaku je pascal [Pa] ten je odvozen jako síla 1 N působící na plochu 1 m².

Pro kapalinu můžeme určit tlak na dně nádoby ze vztahu (1) pro rozložení síly F do složek objemu V , hustoty kapaliny ρ a tíhového zrychlení g se tlak určí jako:

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad (2)$$

Tento zápis nazýváme hydrostatickým tlakem. Ze vzorce vidíme že není závislý na velikosti plochy, ale na výšce kapaliny v nádobě.

Kromě pascalu se můžeme setkat s dalšími používanými jednotkami kterými jsou [bar] odpovídající 10⁵ Pa, používaný v technické praxi, [torr], který je určen výškou rtuťového sloupce v milimetrech, kdy 1 torr = 1 mmHg = 133,322 Pa. Tato jednotka byla v technické praxi zrušena, ale dále se sni můžeme setkat v lékařství. V anglosaských zemích je nejpoužívanější jednotka [psi] neboli libra na čtvereční palec (pound per square inch). Převodem odpovídá 1 psi = 6894,8 Pa. Z atmosférického tlaku při hladině moře se odvozuje fyzikální atmosféra 1 atm = 101325 Pa a technická atmosféra 1 at = 98066 Pa určená z hydrostatického tlaku 10 m vodního sloupce za normálních podmínek a normálního tíhového zrychlení.

Měření tlaku můžeme rozdělit podle referenční hodnoty ke které měříme na:

- absolutní tlak
- diferenční tlak
- relativní tlak

Tlak absolutní měříme od hodnoty vakua. Nemůžeme tak nikdy měřit zápornou hodnotu. Ne vždy ale potřebujeme začít stupni od nejnižšího bodu a pokud chceme pouze porovnání několika tlaků použije se diferenciální tlakoměr. Za speciální případ diferenciálních tlakoměrů lze považovat relativní tlakoměry, které mají za referenční hodnotu atmosférický tlak.

Další rozdělení je možné provést podle principu funkce:

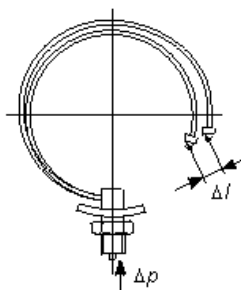
- deformační tlakoměry
- silové tlakoměry
- kapalinové tlakoměry
- elektrické tlakoměry

3.1 Deformační tlakoměry

Tyto tlakoměry využívají změn tvaru vhodného prvku působením tlaku. Deformovaný prvek tlakoměru musí pracovat v oblasti pružné deformace. Deformace jsou obvykle velmi malé, proto jsou tlakoměry ve většině případů vybaveny dodatečným převodem se stupnicí.

3.1.1 Trubicové tlakoměry

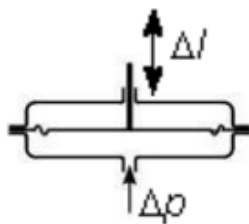
Tvarovým prvkem je trubice eliptického průřezu, stočená do oblouku či spirály. Jeden konec trubice je uzavřen a na druhý je přiveden měřený tlak. Přivedený tlak způsobuje změnu průřezu v kruhový a tím mění zakřivení oblouku trubice. To je dále převodem zobrazováno na ukazateli. Jedná se o nejpoužívanější typ deformačního tlakoměru. Lze s ním měřit tlaky až do velikosti 2 GPa.



Obr. 3.1.. Schéma trubicového tlakoměru [2]

3.1.2 Membránový tlakoměr

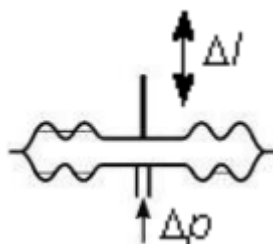
Membrána tvořena destičkou kruhového tvaru upevněná v přírubě. Tlak na jedné straně prohýbá membránu. Membrány jsou obvykle kovové nebo pryžové s pružinou jako deformační prvek, pro nízké tlaky. Mají vyšší citlivost než trubicové, ale nižší rozsah pouze do 4 MPa. Tenká membrána je také vhodná pro rychle pulzující měření.



Obr. 3.2.. Schéma membránového tlakoměru [upraveno] [2]

3.1.3 Krabicový tlakoměr

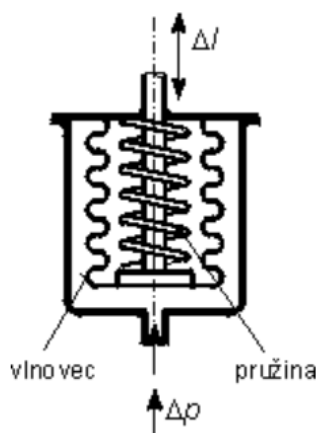
Zdvojením membrány se vytvoří „krabice“, do které se přivádí tlak. Použití nachází při měření nízkých tlaků, podtlaků a diferencí do 1 kPa. Pro vyšší citlivost je možné spojit několik krabic k sobě.



Obr. 3.3.. Schéma krabicového tlakoměru
[upraveno] [2]

3.1.4 Vlnovcový tlakoměr

Do pouzdra s měchem, který tvoří deformační prvek, uvnitř, je přiváděn tlak. Měch vhodnou vně umístěnou pružinou lze ztuhit a docílit změny rozsahu měření. Vlnovcové tlakoměry mají samy o sobě dobrou lineární závislost na tlaku. Lze měřit tlaky, podtlaky i difference do 0,4 MPa.



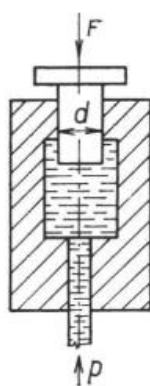
Obr. 3.4.. Schéma vlncového tlakoměru [2]

3.2 Silové tlakoměry

U tohoto druhu je porovnávacím členem síla. Hodnota tlaku se získává z vyrovnání sil referenčních a vytvořeny měřeným tlakem.

3.2.1 Pístový tlakoměr

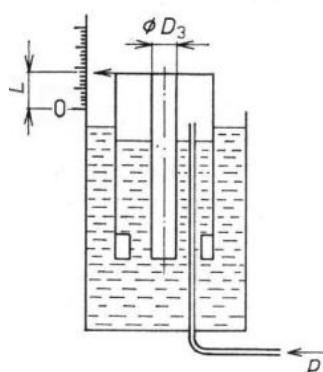
Píst s velmi přesným průměrem je zatížen závažím. Ve vertikální poloze na píst se závažím působí tíhová síla, jež určuje referenční hodnotu. Jednoduše a přesně tak měnit rozsah měření. Do válce ve kterém je píst uložen je přiveden tlak. Obvykle se přivádí přes kapalinu, olej. Využívá se v laboratořích pro ověřování a kalibraci deformačních tlakoměrů do 2 000 MPa jako etalon a pro měření tlaků do 10 MPa.



Obr. 3.5.. Schéma pístového tlakoměru [1]

3.2.2 Zvonový tlakoměr

Zvon je ponořený do kapaliny. Po přívodu tlaku do zvonu, zvon vyplave a hodnota vzniklá výškou o kterou vyplaval znázorňuje velikost tlaku. Uplatnění nachází při ověřování a kalibraci tlakoměrů s rozsahem do 1 000 Pa.



Obr. 3.6.. Schéma zvoncového tlakoměru [1]

3.3 Elektrické tlakoměry

Elektrické tlakoměry využívají vhodných závislosti mezi tlakem a některou elektrickou veličinou. Mohou být použity sami nebo v kombinaci s mechanickými tlakoměry jako převodníky na elektrické veličiny.

3.3.1 Odporový tlakoměr

Odporové tenzometry pracují se změnou svého elektrického odporu v závislosti na své deformaci. Tento jev se také nazývá piezorezistivita. Obvykle se používají jako převod deformace na elektrické veličiny u deformačních tlakoměrů. Dále se používá na měření sil, momentů a dalších veličin, které tak můžeme převést na elektrické veličiny.

U kovových tenzometrů odpor vodiče určíme na základě hustoty, délky a průřezu vodiče jako

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3)$$

potom pro malé deformace bude platit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (4)$$

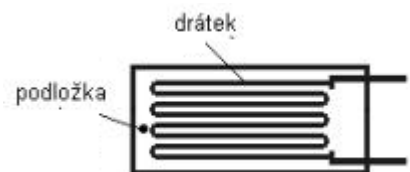
kde ΔR , je změna odporu je změna hustoty $\Delta \rho$ změna délky a ΔS je změna průřezu vodičem. Je-li zachován objem změna nastane na délce a průřezu vodiče, kdy jedna hodnota je z vyšší a druhá poklesne. Uvažujeme relativní deformaci

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

, pak relativní odpor lze odvodit jako

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (6)$$

,kde k je koeficient deformační citlivosti. Ten se v praxi téměř vždy určuje z experimentálních měření. Pro měření s kovovými tenzometry je výhodné, aby délka vodiče byla co největší, proto se vyrábějí s velkým počtem přeložení.



Obr. 3.7.. Schéma odporového tlakoměru [2]

Polovodičové tenzometry se vyrábějí vhodnou úpravou monokrystlů křemík. Odpor se mění změnou pohyblivosti nosičů náboje v ose monokrystalu nebo v difúzní vrstvě polovodiče. Projevuje se zde vyšší nelineárnost v závislosti odporu na namáhání a teplotě. Závislost je vyjádřena vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2 \quad (7)$$

Koeficient citlivosti je pak vyjádřen jako $k = C_1 + C_2$. Ten je mnohonásobně větší než u kovových tenzometrů, ale je zatížen vysokou nelinearitou a je tedy vždy nutno vhodné kompenzování.

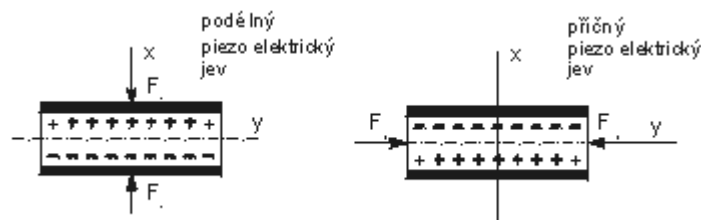
3.3.2 Piezoelektrický tlakoměr

Pracují s piezoelektrickým jevem. Jev spočívá ve vyvolání slabého napětí při deformaci. Materiálem s touto schopností je správně vybroušený křemenný krystal. Nejčastěji se používají k převodu deformace na elektrické napětí a jsou velmi vhodné pro měření dynamických proměnných. Piezoelektrické krystaly mají velmi lineární charakteristiku, která je nepatrně závislá na teplotě s velkým teplotním rozsahem. Síla, která působí po elektrické ose X vytvoří malý náboj Q. Ten nezávisí na rozměrech výseku krystalu, ale pouze na velikosti síly F_x a piezoelektrické konstantě materiálu K_p .

$$Q = F_x \cdot K_p \quad (8)$$

Hovoříme o podélném piezoelektrickém jevu. Příčný piezoelektrický jev působí kolmo na osu X, je závislý na geometrických rozměrech výseku a náboj je opačný.

$$Q = F_x \cdot K_p \cdot \frac{a}{b} \quad (9)$$



Obr. 3.8.. Vliv síly na generovaný náboj [2]

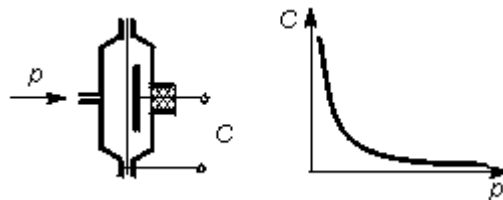
3.3.3 Kapacitní tlakoměr

Jedná se o kondenzátor u kterého v závislosti na měřené veličině měníme jeho kapacitu. Toho se docílí změnami vzdálenosti jejich desek. Velikost kapacity odvodíme z deskového kondenzátoru jako

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (10)$$

kde je S plocha elektrod, d vzdálenost elektrod, ε_0 permitivita vakua, ε_r poměrná permitivita.

Jak je vidět závislost je velmi nelineární a proto je vyráběn s linearizačními obvody doplněnými o kompenzaci parazitních kapacit. Měřicí rozsah se pohybuje mezi 100 Pa až 40 MPa.



Obr. 3.9..Kapacitní snímač s průběhem [2]

3.4 Hydrostatické tlakoměry

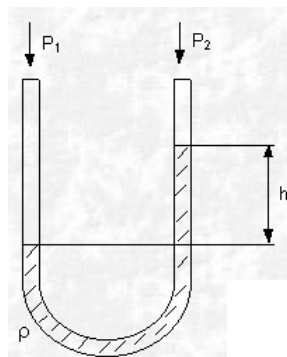
Referenční hodnotou hydrostatických tlakoměrů je tlak vytvořený sloupcem kapaliny. Nejsou vhodné pro měření velkých tlaků, neboť by museli být sami velkých rozměrů.

3.4.1 U-trubice

Je nejjednodušším tlakoměrem. Měří výškový rozdíl kapaliny na dvou ramenech trubice ve tvaru U. Poklesne-li hladina, respektive stoupne-li hladina v jednom z ramen, dá se odhadnout hodnota působícího tlaku z rozdílu hladin. Je velmi přesný a tak vhodný pro přesné laboratorní práce. Nejčastěji používanými tlakoměrnými kapalinami jsou voda, alkohol a rtuť. Největším omezením je výška trubice neboť potřebuje dostatek místa pro vyšší tlakové rozdíly.

$$h_1 \cdot \rho \cdot g + p_1 = h_2 \cdot \rho \cdot g + p_2 \quad (11)$$

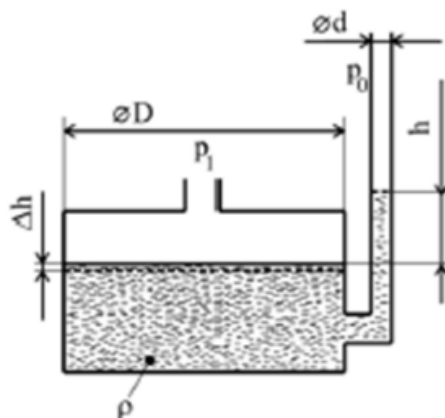
$$h = h_1 - h_2 = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho \cdot g} \quad (12)$$



Obr. 3.10.. U-trubice [upraveno] [6]

3.4.2 Nádobkový tlakoměr

Pokud U-trubic na jednom rameni dostatečně rozšíříme dosáhneme uspořádáme nádoba-trubice. Tímto přeneseme nutnost odčítání ze dvou ramen na užší kalibrované rameno.

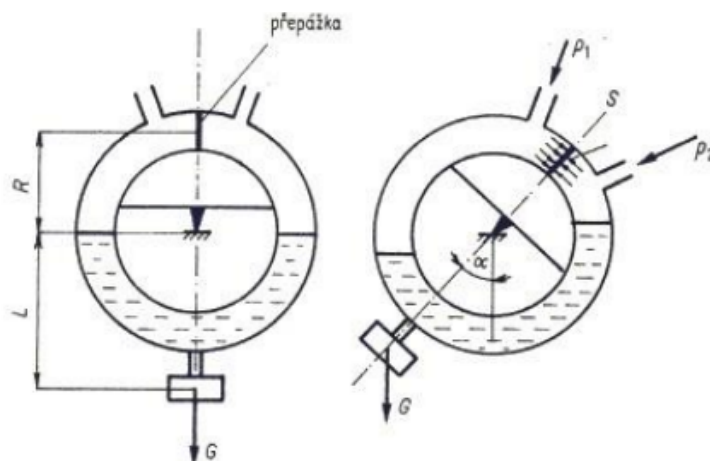


Obr. 3.11..Nádobkový tlakoměr [24]

Trubice nemusí zůstat svislá, ale můžeme ji sklonit o úhel α . Kapaliny vystoupá výše a zvýšíme rozsah s citlivost přístroje s větším sklonem trubice.

3.4.3 Prstencový tlakoměr

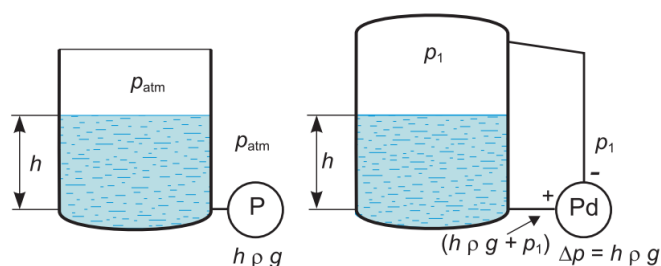
Je tvořený kruhovou trubicí, otočně uloženou ve svém středu. Trubice je částečně naplněná kapalinou, která spolu s přepážkou umístěnou tvoří mezi přívody tlaku, tvoří dvě ramena. Na spodní část prstence je připevněno závaží, které určí základní polohu v klidovém stavu a slouží pro změny rozsahu tlakoměru.



Obr. 3.12..Prstencový tlakoměr [25]

3.5 Měření hydrostatického tlaku

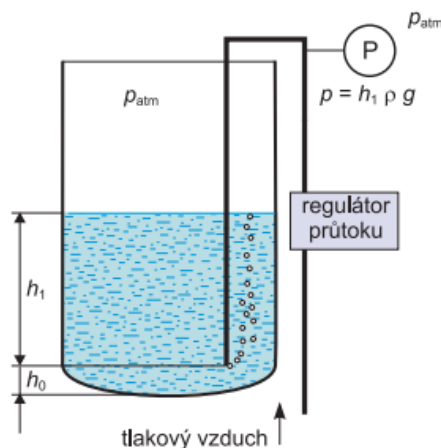
Protože hydrostatický tlak je závislý na výšce sloupce kapaliny je vždy nutné měřit tlak u dna případně kompenzovat vzdálenost ode dna. Přímá metoda bývá použití diferenčního tlakoměru u dna. Tlakoměr porovnává tlak v nádobě s tlakem referenčním. Ten podle typu nádoby bývá tlakem okolním u otevřených nádob nebo tlakem uvnitř uzavřených nádob.



Obr. 3.13.. Měření hydrostatického tlaku [13]

V případech kdy není možné upevnit tlakoměr nalezne své místo ponorná sonda. Jde o snímač tlaku připevněný na lanku nebo tyči ponořené do kapaliny. Je nutné, aby byl odstraněn vlivu atmosférického tlaku. U diferenčních snímačů jde o přivedení tlaku dodatečnou hadičkou nebo změřením a odečtením atmosférického tlaku u absolutních měřidel.

Jinou metodou je měření probubláváním. Do nádoby je přivedeno trubičkou malé množství vzduchu. Aby vzduch začal unikat musí překonat hydrostatický tlak v nádobě.

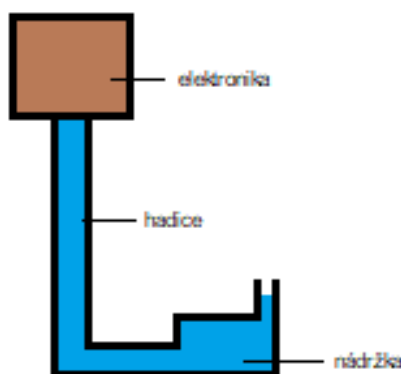


Obr. 3.14.. Měření hydrostatického tlaku probubláváním [13]

4 Použité součásti

4.1 Popis zařízení

Zařízení má být schopné měření výšek za pomoci hydrostatického tlaku a celý návrh má být implementován na platformě Arduino. Bude měřen podtlak vytvořený vodním sloupcem a z něj dopočítávána výška senzoru vůči nulovému bodu. K maximální výšce dojde při vyrovnání tlaku vodního sloupce a atmosférického tlaku. Pro předpoklad využití maximálního potenciálu Dále bude požadován momentální výstup měřených údajů. K tomu poslouží LCD display.



Obr. 4.1.. Zjednodušený návrh

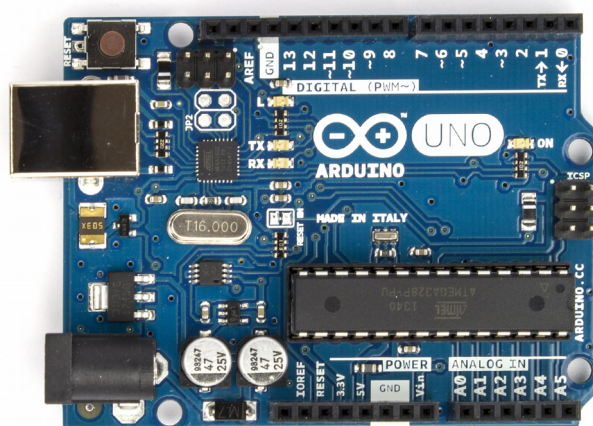
4.2 Arduino

Arduino bylo vytvořeno jako cenově dostupná výuková a vývojová platforma pro studenty, ale obliby se dočkala i mezi širokou veřejností pro domácí aplikace. Vývojáři se rozhodli poskytnout veškerou dokumentaci pod opensource licencí pro lepší práci s deskou. To bylo také důvodem vytvoření bezpočtu kopií neboli „klonů“. Ty ač kopírují Arduino nemusí mít složené certifikáty bezpečnosti a kvality pro které se nemusíme bát použití v průmyslu. Desky jsou převážně založeny na procesorech ATMega od firmy Atmel. Na trhu existuje několik variant provedení desky, které se liší v počtu digitálních a analogových pinů, případně způsoby připojení a programování. Nejmenším z verzí arduin je Mini, navržené pro úsporu místa. Naopak největším a nejvýkonnějším je arduino Tre s 1 GHz procesorem.

Pro programování využijeme oficiálního rozhraní Arduinu IDE, které lze zdarma stáhnout na webových stránkách arduina. Programování lze provést pomocí jazyků C a C++, nejjednodušší a nejrozšířenější způsobem je použití knihovny Wiring jazyka C++, o které se někdy hovoří jako o samostatném programovacím jazyce. V Arduino IDE se

nachází velké množství knihoven od komunity, ale také od samotných výrobců periferií. Na desku lze připevnit další periferie neboli shiedly bez složitého propojování.

K zhotovení práce byla vybráno na Arduino Uno. Deska používá mikrokontroler ATmega328P s operačním napětím 5 V doplněným o převodník na 3,3 V výstup. Doporučené napájecí napětí je mezi 7 a 12 V. Ke komunikaci se shiedly slouží sada 6-ti analogových vstupů, 14 vstupně výstupních digitálních pinů z nich 6 lze používat v módu PWM. Dále USB port pro napájení a komunikaci s PC.



Obr. 4.2.. Arduino UNO [15]

4.3 LCD

Pro textový výstup bez připojení na PC použijeme znakový LCD display. U těchto displejů se rozlišení udává na počet řádků a sloupců pro znaky. Běžně se pracuje s rozlišením 8x1 až 40x4 znaků. Arduino IDE disponuje už ve svém základu knihovnamí pro práci s tímto druhem displejů. Pro náš účel poslouží knihovna LiquidCrystal.h. Tato knihovna zajišťuje komunikaci při připojení displaye přímo na piny Arduina, toto zabere minimálně 10 pinů. Pokud nemáme dostatek pinů můžeme display připojit přes 4 vodiče dodatečného I2C převodníku.

4.4 Tlakový senzor

Na trhu existuje množství tlakových senzorů. Rozhodujícími faktory pro výběr jsou poměr cena přesnost, rozsah měření. Ten předpokládá využití celého rozsahu použité metody.

Pro měření tlaku bylo zvoleno senzory ze série ABP od společnosti Honeywell. Jedná se o piezodoporový typ snímače. Cenově blíží se nižší hranici v porovnání s ostatními podobnými snímači. Snímače jsou teplotně kompenzované od 0°C od 50 °C. Dalším přednostním prvkem je vestavěný zesilovač pro zesílení výstupního signálu. Dostupné provedení jsou jak s analogovým tak digitálním výstupem s přesností 0,25%. Pro naše účely byl vybrán ABPLANT015PD2A5. Jde se o rozdílový typ měřiče. Dále splňuje požadavek na měření kapalného média a dokáže měřit v rozmezí -15 až 15 psi neboli $\pm 103\,421.359$ Pa. Důvodem pro rozsah měřidla v psi raději než v Pa je nedostupnost jiného měřidla, které by zvládlo pracovat s tlaky jen o málo vyššími než je atmosférický tlak. Výstupní signál byl upřednostněn digitální ve formě sběrnice I2C. Digitální signál poskytuje 12 bitový výsledek. Pokud by byl zvolen analogový výstup arduino poskytuje 10 bitový AC/DC převodník nebo pro větší přesnost by bylo nutno vlastního převodníku.



Obr. 4.3.. Tlakový senzor [20]

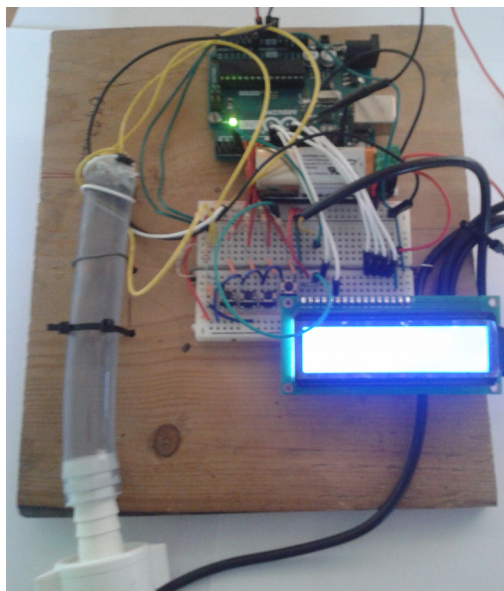
4.5 Teplotní čidlo

Pro převod teploty na napětí použijeme integrovaný obvod DS18B20. Toto teplotní čidlo má programovatelný digitální výstup 9 až 12 bitů. Výstupní rozlišení se tak může pohybovat v rozmezí 0,5°C , 0,25°C , 0,125°C ,0,0625 °C. Kompenzací za vyšší rozlišení je celkový čas potřebný ke změření. Teplotní rozsah je od -55°C do 125°C s přesností $\pm 0,5^\circ\text{C}$ mezi -10°C a 85°C. Každý DS18B20 má svou unikátní 64-bitovou adresu, je tak možné na jedné lince provozovat několik čidel zároveň.

4.6 Sestavení

K výše uvedeným součástkám přidáme čirou hadici pro optickou kontrolu kapaliny uvnitř. Do té je na jednom konci vloženo čidlo a je vodotěsně izolován. Druhý konec je opatřen nádobkou na přebytečnou kapalinu. LCD a DS18B20 jsou připojeny na digitální piny Arduina podle schématu v příloze číslo jedna. Na místo plošného spoje bylo použito kontaktní nepájivé pole.

Tento odstavec se bude zabývat pouze potřebami jednotlivých dílů. Kompletní elektrické zapojení lze nalézt v příloze. Z dokumentace pro Arduino vyčteme, že má možnost napájení ze 7 až 12 V přivedených mezi piny Vin a GND. Zabudovaný usměrňovač pak dodává po celé desce 5 V. Druhý usměrňovač v případě potřeby usměrní napětí na 3,3 V. Při výběru baterie je tak uvažováno nad čtyřmi 1,5 V bateriemi nebo jednou 9 V. Zvolena byla 9 V baterie. U displeje zapojujeme piny RS, E, D4, D5, D6 a D7 přímo na piny Arduina. Toto pořadí pak v programu odpovídá zápisu použitých pinů Arduina při inicializaci displeje. Napájet se bude 5 V napětím na Vdd. K zemi připojíme K, RW a Vss. Ostatní není nutné připojovat. Teplotní čidlo je napájeno 5 V. Mezi výstup a napájení čidla je podle výrobce vhodné vsadit pull-up rezistor o hodnotě 5 k Ω . Stejný požadavek je doporučen pro zapojení vývodů SCL a SDA I2C sběrnice tlakového čidla. Dále pro účely měření jsou zapojeny 3 spínače mezi 5 V a piny arduina. Všechny tři jsou uzemněny přes 10 k Ω pull-down rezistor .



Obr. 4.4..Sestavené zařízení

4.7 Programové řešení

Disponuje knihovnou <LiquidCrystal.h> na komunikaci s LCD displeji. Je umožněn přenos textu, číselných hodnot případně vytvoření svých jednoduchých charakterů. Tato možnost zabírá velký počet pinů a v případech potřeby ušetřit několik pinů je možné přidat převaděč na I2C komunikaci a knihovnu <LiquidCrystalI2C.h> vytvořenou pro tyto účely. V tomto případě máme dostatek místa proto této možnosti nevyužijeme.

Pro teplotní čidlo vydává výrobce vlastní oficiální knihovnu DallasTemperature.h. Ta umožňuje nastavování. Zařízení komunikuje pomocí protokolů knihovny OneWire.h. Jedná se o protokoly které umožňují přenos dat i z několika zařízení na jedné lince.

```
OneWire oneWire(teplotaADR);
DallasTemperature tempsensor(&oneWire);
```

Obr. 4.5..Kód inicializace DS18B20

Tlakový senzor komunikuje prostřednictvím I2C protokolů. Zajišťuje knihovna <Wire.h>. Pro usnadnění se použila uživatelská knihovna.[22] Při přímém požadavku na zaslání dat senzoru byla data velmi nestabilní v rozsahu až 100 Pa, usměrnění bylo dosaženo určením průměrné hodnoty deseti měření senzorem na rozsah 20 Pa.

Pro zaslání dat se používá struktura na obrázku 4.6

```
27 void Honeywell_ABP::update() {
28     Wire.requestFrom(_address, (uint8_t)2);
29     while(Wire.available()) {
30         uint8_t data_byte_1 = Wire.read();
31         uint8_t data_byte_2 = Wire.read();
32         _status = Honeywell_ABP::Status(data_byte_1 >> 6);
33         _bridge_data = (data_byte_1 << 8 | data_byte_2) & 0x3FFF;
34     }
35     _pressure = raw_to_pressure(_bridge_data);
36 }
37
38 float Honeywell_ABP::raw_to_pressure(uint16_t output) {
39     return float(constrain(output, _output_min, _output_max) - _output_min)
40         * (_p_max - _p_min) / (_output_max - _output_min) + _p_min;
41 }
```

Obr. 4.6..Kód data z tlakového senzoru

Struktura zašle požadavek na data senzoru, ten posílá nazpět 14 bitů. První dva biti jsou stavové pro diagnostiku zařízení. Zbýlých dvanáct bitů jsou data v binární soustavě. Na řádku 33 se binárně sečtou hodnoty a odstraní stavové bity. Převodovou rovnici ze zaslaných dat na tlak udává datasheet.[21]

Všechny spínače používají podobnou strukturu vyhodnocování. První ze spínačů mění zobrazování displeje. Lze přepínat mezi kombinacemi zobrazení měřené délky, tlaku a teploty. Druhý spínač mění výpočet hustoty mezi konstantní hodnotou a hodnotou závislou na teplotě. Zároveň mění texty psané na displeji velkým písmem pro konstantní hustotu a malým pro proměnnou. Třetí spínač je v případě potřeby určen k zamrazení displeje.

```

BUTTON1=digitalRead(BUTTON1adr);
if (activeBUTTON1 == 0){
    if (BUTTON1== HIGH ){
        lcdstate += 1;
        if (lcdstate > 3){
            lcdstate=1;
        }
        activeBUTTON1 =1;
        delay(100);
    }
}else if(BUTTON1==LOW){
    activeBUTTON1=0;
    delay(100);
}

```

Obr. 4.7..Ukázka logiky spínačů

5 Faktory ovlivňující měření

5.1 Závislost hustoty

Na změnách hustoty bude mít největší podíl teplota použité kapaliny. U destilované vody je hustota pro jednotlivé teploty dobře dohledatelná. Hodnoty pro jednotlivé teploty jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 1..Hustota destilované vody pro vybrané teploty [26]

°C	kg/m ³	°C	kg/m ³	°C	kg/m ³	°C	kg/m ³
0	999,8426	9	999,7834	18	998,5976	27	996,5166
1	999,9015	10	999,7021	19	998,4073	28	996,2371
2	999,9429	11	999,6074	20	998,2063	29	995,9486
3	999,9672	12	999,4996	21	997,9948	30	995,6511
4	999,9750	13	999,3792	22	997,7730	31	995,3450
5	999,9668	14	999,2464	23	997,5412	32	995,0302
6	999,9430	15	999,1016	24	997,2994	33	994,7071
7	999,9043	16	998,9450	25	997,0480	34	994,3756
8	999,8500	17	998,7769	26	996,7870	35	994,0359

Hodnoty z tabulky aproximujeme do rovnice

$$\rho = 4,40888 \cdot T^3 + (-0,0801 \cdot T^2) + 0,60399 \cdot T + 999,85346 \quad (12)$$

Důraz je kladen na teploty v okolí 20°C, kde je předpokládán největší provoz. Největší rozdíl hustot v našem rozsahu použití je mezi 34 a 35°C a to 0,34 kg/m³. Při tlaku 10000 Pa to odpovídá rozdílu 0,35 mm vodního sloupce. V případě měření s nekompenzovanou hustotou bude používána hodnota 998 kg/m³, tedy přibližně hustota při 20 °C.

Odchylka u tepelného čidla je výrobcem udávána lepší než +/-0,5°C na celém rozsahu měření. Digitální výstup senzoru lze nastavit na 9, 10, 11 nebo 12 bitů respektive na 0,5°C , 0,25°C , 0,125°C ,0,0625 °C.

5.2 Tíhová závislost

Působící tíhové zrychlení není stálé a liší se polohou na zeměpisné šířce. Nabývá hodnot od $9,832 \text{ m/s}^2$ na zemském pólu až k $9,780 \text{ m/s}^2$ na rovníku. Na území České republiky je přibližná hodnota mezi $9,807 \text{ m/s}^2$ a $9,811 \text{ m/s}^2$. Takový rozdíl způsobí při tlaku 10000 Pa vytvořeného vodním sloupcem o hustotě 998 kg/m^3 rozdíl $0,4 \text{ mm}$. Ve všech výpočtech bude používána střední hodnoty $9,809 \text{ m/s}^2$ maximální odchylka tak bude $\pm 0,2 \text{ mm}$.

5.3 Tlaková závislost

Aktuální hodnota atmosférického tlaku může způsobit offset tlakoměru, pokud nebude nastavena správná referenční hodnota. Jinak nebude mít další vliv na přesnost měření měření. K použití byl vybrán diferenční tlakoměr a k referenci použije atmosférický tlak. U tlakoměru ABPLANT015PD2A5 výrobce uvádí chybu $0,25\%$ z rozsahu to jest $0,075 \text{ psi}$ nebo $517,11 \text{ Pa}$.

5.4 Konstrukční chyby

V rámci konstrukce byly změřeny výška vodní hladiny od země a délka tlakového senzoru od měřicího bodu. Tyto hodnoty byly změřeny na milimetry.

6 Měření

První sérii měření provedeme pro stejnou výškovou úroveň v 1 a 2 metrech za neregulované teploty. Bude zjišťována schopnost přenášení výšek zařízením.

V druhém měření budeme porovnávat vliv teploty na 2 m výšky vodního sloupce.

Měření byla navržena, aby ověřila vlivy teploty a odhadla chybu měření zařízení. Zkouška se provedla v jedné místnosti. Na stěnách místnosti byly pomocí hadicové vodováhy vyznačeny měřící body. Základní přenášený bod byl ve výšce 1 a 2 metry. Před měřením byla celá soustava ponechána v místnosti pro tepelné vyrovnání. Hodnoty byly zaokrouhleny na desetiny milimetru a zapisovány ručně po zamrazení displeje. Zařízení nebylo schopno se ustálit a vykazovalo kolísání hodnot v rozmezí 20 Pa.

7 Výsledky

První měření

Prvním měřením pozoruje přesnost na stejné nivelační úrovni.

Tabulka 2..Naměřené hodnoty při 2 m a 1 m

n	$h_{2m}[m]$	$h_{2m}-h_p [m]$	$h_{1m} [m]$	$h_{1m}-h_p [m]$
1	2,0007	-0,0062	1,0223	-0,0072
2	2,0055	-0,0014	1,0304	0,0008
3	1,9942	-0,0127	1,0272	-0,0024
4	2,0087	0,0018	1,0336	0,0041
5	2,0007	-0,0062	1,0255	-0,0040
6	2,0023	-0,0046	1,0304	0,0008
7	2,0152	0,0083	1,0272	-0,0024
8	2,0055	-0,0014	1,0336	0,0041
9	2,0023	-0,0046	1,0255	-0,0040
10	2,0055	-0,0014	1,0368	0,0073
11	2,0152	0,0083	1,0336	0,0041
12	2,0152	0,0083	1,0368	0,0073
13	2,0087	0,0018	1,0275	-0,0020
14	2,0152	0,0083	1,0191	-0,0104
15	2,0087	0,0018	1,0336	0,0041
Průměr h_p	2,0069		1,0295	
Směrodatná odchylka	0,00639		0,00522	

Měřilo se při 24 °C ale bez regulace hustoty. Na každém z pěti bodů byly provedeny 3 měření. Výsledky pro dvou metrové měření ukazují odchylku až 15 mm s průměrnou hodnotou 6,9 mm rozdílu od 2 m. Hodnoty pro jeden metr vykazují nejvyšší rozdíl až 37 mm a nejnižší 19 mm.

Na měření se mohla negativně projevit schopnost měřiče, který držel zařízení, kdy se každý menší pohyb na výsledcích projevil. Dále se mohla projevit pozice nádoby, která nemusela sdílet nulovou hodnotu s nulovou hodnotu měřených úrovní, kvůli nerovnosti podlahy. Nepříliš správné také bylo provádět neregulované měření.

Druhé měření

Při druhém měření bylo pozorováno vliv teploty na výšku vodního sloupce.

Tabulka 3..Hodnoty měření regulované a neregulované teploty

n	h_konst [m]	'h_15 [m]
1	2,04133	2,08048
2	2,04401	2,08427
3	2,03972	2,08256
4	2,05891	2,08041
5	2,04917	2,08847
6	2,04292	2,08136
7	2,04292	2,08458
8	2,04072	2,08351
9	2,06241	2,07925
Průměr	2,0469	2,0828
Směrodatná odchylka	0,00830	0,00282

Měření probíhalo při 15 °C. Regulovaná hustota má při této teplotě vyšší hodnotu než použitá konstantní. V průměru se liší o 35,8 mm, což je velice nad očekávání z rozdílů teplot se očekávala odchylka 9 mm. Protože se změnil pouze způsob přepočtu během měření, takový to rozdíl by mohla být hrubá chyba měřiče, všechny hodnoty však byly měřeny pro stejné body. Tato chyba je tedy minimální.

8 Energetická náročnost

Následující odstavec se bude věnovat odhadnutí celkové doby provozu na jednu baterii. U použité 9 V baterie bylo zjištěna kapacita 630 mAh. Samotné Arduino ke svému provozu potřebuje proud o 50 mA. Pro display odebírá 1 mA, teplotní čidlo 1 mA a tlakový senzor 3,7 mA. To dává dohromady 55,7 mA, které potřebuje soustava k provozu. Odhadovaný příkon bude:

$$P_{odhad} = U \cdot I = 9 \cdot 0,0557 = 0,5 \text{ W}$$

Čas, který dokáže baterie udržet soustavu v chodu je:

$$t_{odhad} = \frac{C}{I} = \frac{630}{57,7} = 10,9 \text{ h}$$

Při samotném měření odběru proudu byla hodnota 58,2 mA a napětí baterie 7,19 V.

$$P_{odhad} = U \cdot I = 7,19 \cdot 0,0582 = 0,42 \text{ W}$$

Odhadovaný reálný čas bude

$$t_{odhad} = \frac{C}{I} = \frac{630}{58,2} = 10,8 \text{ h}$$

Jak je vidět odhadovaná spotřeba se od té reálné se tolik neliší. Při provozu můžeme předpokládat, že výdrž baterie bude ještě menší.

9 Závěr

Na začátku práce byla provedena rešeršní studie na témata nivelační zařízení a měření tlaku, popisující nejpoužívanější přístroje a metody. Hlavní část se věnovala návrhu a realizaci elektrického nivelačního zařízení. Zařízení je provozováno na vývojové platformě Arduino, jež bylo popsáno i s ostatními komponenty použitými při tvorbě zařízení. Jedná se o LCD displej použitý k výstupu výsledků, tlakový senzor ABPLANT015PD2A5 jako měřicí prvek a teplotní čidlo DS18B20 sloužící k tepelné kompenzaci. Elektrické zapojení bylo zhotovené na vodivém nepojivém poli. Z programového řešení se k popisu vybraly důležité části k pochopení.

Měření sice proběhlo v domácích podmínkách, ale bylo provedeno s veškerou obezřetností. Hledaly se rozdíly v naměřených hodnotách při různých teplotách, které mají na výsledky největší vliv. Popsány byli i další vlivy, které budou ovlivňovat měření.

Výsledky nevedly k přesným měřením avšak ukázali potenciál v dané oblasti. Sestavené zařízení se ukázalo jako přebytně naddimenzované pro praktické použití. To nevadilo protože bylo navrženo k zjištění svého potenciálu. Pro další vývoj bude cílem optimalizace a minimalizace.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Měření mechanických veličin* [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/ramce_tlak.htm
- [2] *Měření tlaku* [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT/F4/F4-ram.htm>
- [3] Snímače tlaku. *ELUC* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/961>
- [4] KADLEC, Karel a Jan VACULÍK. Hydrostatické hladinoměry – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA* [online]. 2014, 2014(7), 34-38 [cit. 2021-5-20]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52563.pdf
- [5] K. Měření technologických veličin. *Ústav počítačové a řídicí techniky* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/2-FPBT09-Tlak.pdf>
- [6] Měření tlaku. *E-automatizace.cz* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/senzory/tlak.html>
- [7] BARTOŠÍK, Petr. Zpátky do Evropy, zpátky k barům? *AUTOMA* [online]. 2015, 2015(5), 18 [cit. 2021-5-20]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/53693.pdf
- [8] Dějiny zeměměřictví. *Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galerie-souboru/planka/dejiny_zememerictvi/DEJINY_Z_06_METODY_MERENI_STUDENTI.pdf
- [9] DIGITÁLNÍ VODOVÁHA. *Sola.at* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.sola.at/cs-cz/produktu/digitalni-vodovahy-c250288>
- [10] Digitální hadicová vodováha NIVCOMP. *GEOServer* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.geoserver.cz/nivelacni-pristroje-akcni-sety-prislusenstvi-stativy-late/digitalni-hadicova-vodovaha-nivcomp/digitalni_hadicova_vodovaha_nivcomp_s_bonusem-digitalni_hadicova_vodovaha_nivcomp

- [11] Digitální vodováha. *Vývoj.HW.cz* [online]. 2009 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/digitalni-vodovaha.html>
- [12] Rotační a křížový laser a jejich využití ve stavebnictví. *Nivelo.cz* [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nivelo.cz/cz/blog/rotacni-a-krizovy-laser-a-jejich-vyuziti-ve-stavebnictvi/>
- [13] Hydrostatické hladinoměry – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA* [online]. 2014, 2014(7), 34-38 [cit. 2021-5-11]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52563.pdf
- [14] VODA, Zbyšek a tým HW Kitchen. *PRŮVODCE SVĚTEM ARDUINA* [online]. Martin Stříž, 2018 [cit. 2021-5-20]. ISBN 978-80-87106-93-8. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitchen.cz/wp-content/uploads/cdn/ebook-v103.pdf>
- [15] ARDUINO UNO REV3. *Arduino Official Store* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [16] Arduino běžící na baterky. *Arduino Official Store* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.1cip.radekc.eu/clanek/arduino-bezici-na-baterky>
- [17] LCD 16x2 modul - spotřeba. *Hw-list* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://list.hw.cz/pipermail/hw-list/2013-August/444048.html>
- [18] GP Ultra Alkaline 9V PP3 6LR61 Batteries. *BatteryStation.co.uk* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.batterystation.co.uk/gp-ultra-alkaline-9v-pp3-6lr61-batteries-4-pack/>
- [19] DS18B20. *Maxim Integrated* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [20] Basic ABP Series. *Honeywell* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://sps.honeywell.com/us/en/products/sensing-and-iot/sensors/pressure-sensors/board-mount-pressure-sensors/basic-abp-series>
- [21] I2C Communications with Honeywell Digital Output Pressure Sensors. *Honeywell* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://sensing.honeywell.com/i2c-comms-digital-output-pressure-sensors-tn-008201-3-en-final-30may12.pdf>
- [22] Honeywell_ABP. *GitHub* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://github.com/ij96/Honeywell_ABP

- [23] EXTOL CRAFT 34900. *Alza.cz* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/hobby/extol-craft-34900-d6469541.htm>
- [24] KLIMKO, Marek. STATIKA TEKUTIN. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~kovarikp/MT/cviceni/cviceni_MT_2.pdf
- [25] MĚŘENÍ TLAKU. *Maryshfmmi.webzdarma.cz* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mertl.htm>
- [26] TABULKY FYZIKÁLNÍCH KONSTANT. *Ústav fyzik Stavební fakulty VUT v Brně* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/tabulky.pdf
- [27] Měření nivelačním přístrojem. *Mylms* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/mereni-nivelacnim-pristrojem/>

Seznam obrázků

Obr. 2.1..Digitální vodováha.....	10
Obr. 2.2.Hadicová vodováha.....	11
Obr. 2.3..Elektronická hadicová vodováha [10].....	11
Obr. 2.4..Měření nivelačním přístrojem [27].....	12
Obr. 2.5..Rotační laser [23].....	12
Obr. 3.1.. Schéma trubicového tlakoměru [2].....	14
Obr. 3.2.. Schéma membránového tlakoměru [upraveno] [2].....	14
Obr. 3.3.. Schéma krabicového tlakoměru [upraveno] [2].....	15
Obr. 3.4.. Schéma vlncového tlakoměru [2].....	15
Obr. 3.5.. Schéma pístového tlakoměru [1].....	16
Obr. 3.6.. Schéma zvoncového tlakoměru [1].....	16
Obr. 3.7.. Schéma odporového tlakoměru [2].....	17
Obr. 3.8.. Vliv síly na generovaný náboj [2].....	18
Obr. 3.9..Kapacitní snímač s průběhem [2].....	19
Obr. 3.10.. U-trubice [upraveno] [6].....	19
Obr. 3.11..Nádobkový tlakoměr [24].....	20
Obr. 3.12..Prstencový tlakoměr [25].....	20
Obr. 3.13.. Měření hydrostatického tlaku [13].....	21
Obr. 3.14.. Měření hydrostatického tlaku probubláváním [13].....	21
Obr. 4.1.. Zjednodušený návrh.....	22
Obr. 4.2.. Arduino UNO [15].....	23
Obr. 4.3.. Tlakový senzor [20].....	24
Obr. 4.4..Sestavené zařízení.....	25
Obr. 4.5..Kód inicializace DS18B20.....	26
Obr. 4.6..Kód data z tlakového senzoru.....	26
Obr. 4.7..Ukázka logiky spínačů.....	27

Seznam tabulek

Tabulka 1..Hustota destilované vody pro vybrané teploty [26][].	28
Tabulka 2..Naměřené hodnoty při 2 m a 1 m.....	30
Tabulka 3..Hodnoty měření regulované a neregulované teploty.....	31

Seznam příloh

- Příloha A Schéma elektrického obvodu
- Příloha B Program